УДК 658.01

ПЕРВЫЕ ШАГИ РОБАСТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ОТЕЧЕСТВЕННОМ АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

Ю.К. Чернова, В.В. Щипанов

Тольяттинский государственный университет
E-mail: Kachectvo@tltsu.ru

Рассмотрена сущность робастного проектирования на основе методов Тагути, описана образовательная программа для повышения квалификации инженерного корпуса ОАО «АВТОВАЗ» по робастному проектированию и приведен пример робастного проектирования автомобильного элемента.

Анализ деятельности японских и американских автомобильных предприятий приводит к выводам, что результат определяется качеством работы в самом широком смысле этого слова, а работу выполняют люди. «Революция качества» в Японии стала возможной, потому что для японцев качество – это одержимость, оно стояло впереди всех проблем для каждого работника, понятие «улучшение качества» стало применимым для любой сферы деятельности предприятия. Руководство японских фирм представляет все необходимые условия для качественной работы своим сотрудникам, организует соответствующую программу развития и обучения.

На ВАЗе стали понимать, что повышение конкурентоспособности автомобилей возможно, если овладеть тем искусством, которым блестяще владеют конкуренты, перенять его и сделать совершение. После появления совместного проекта «GM-АВТОВАЗ» многие сотрудники смогли непосредственно увидеть, как работают за рубежом, как заинтересовывают людей в качественном и высокопроизводительном труде, как добиваются того, чтобы люди могли оценивать качество своей деятельности.

Проектирование качественных систем (инжиниринг качества) в Японии называется робастным проектированием (РП). При этом оценка особенностей системы, ее стоимости и качества должны рассматриваться как системная проблема. Решению многих аспектов этой проблемы способствует применение методов РП, называемых методами Тагути. К ним относятся структурирование функции качества (СФК), функция потерь качества (ФПК), отношения сигнал/шум (С/Ш), в основе которых лежит математическая статистика. Японские подходы приносят миллиардные доходы предприятиям и фирмам. Их применение для предприятий составляет *ноу-хау* и нигде не афишируется. В Америке институт, ранее возглавляемый самим Г. Тагути, проводит обучение этим методам. Сегодня передовые организации Америки и Европы используют РП и получают большую прибыль.

Процесс СФК включает пять элементов:

- уточнение требований потребителя (*что*);
- перевод требований потребителя в общие характеристики продукта (*как сделать*);
- выявление тесности связи между соответствующими компонентами, *что* и *как*;
- выбор цели, т. е. таких значений параметра качества ожидаемого продукта, которые соответствовали бы ожиданиям потребителя;
- установление рейтинга важности компонента *что* и на основе этих данных определение рейтинга важности *как*.

Рассматриваемые пять ключевых элементов СФК трансформируются в матрицы СФК (плановая, проектная, процессная и производственная), которые представляют четыре этапа отслеживания «голоса потребителя»: планирование продукта – проектирование продукта – проектирование процесса – проектирование производства. Это и есть развертывание голоса потребителя. С помощью матричных диаграмм СФК, обеспечивается сохранение фокуса на потребителя при переходе от этапа к этапу.

Управление качеством в полном смысле этого слова возможно через минимизацию вариаций или способность спроектировать систему нечувствительной к вариациям (робастной) при уменьшении стоимости.

Вариабельность противодействует полезным усилиям разработчиков и определяется наличием шумовых факторов (ШФ), которых выделяют три типа: внешние, разброс от образца к образцу, внутренние факторы за счет старения и деградации.

Шумы трудно убрать, но можно уменьшить их влияние на качество. Эта проблема решается путем РП на всех стадиях жизненного цикла:

- исследование (процесс проектирования робастных технологий);
- разработка продукции (методы нечувствительности к ШФ)
- выпуск опытных образцов (оптимизация стоимости качества);
- производство, сервис (стабилизация характеристик относительно целевых значений).

Применение РП определяет *качество разработчика* (OFF-line – качество), которое осуществляется в три этапа, табл. 1.

Глубинной концепцией достижения качества потребителей для производителей всегда было понятное желание попадания всех изделий в пределы технических спецификаций, не зависимо от того, где они находятся. При этом все изделия в пределах спецификации считались хорошими (приемлемыми), а

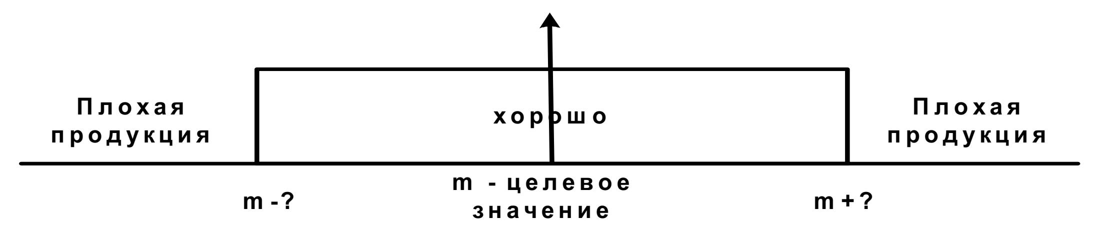


Рис. 1. *Допускное значение*

все остальные плохими. Профессионалы по качеству иногда называют эту концепцию «менталитетом ворот» или «допусковым мышлением» (рис. 1).

Таблица 1. *Этапы OFF-line качества*

Название этапа	*Действие*
Концептуальное проектирование	Выбор наилучшего варианта
Параметрическое проектирование	Оптимизация выбранного варианта по отношению ШФ
Планирование допусков	Распределение допусков на выбранные параметры

Сегодня все чаще модель «хороший-плохой» заменяется более полезной моделью, представляемую параболой:

$$L(y)=\frac{A_0}{\Delta^2}\cdot(y-m)^2, \quad L(y)=k\cdot(\bar{y}-m)^2,$$

где $L(y)$ – потери в стоимостном выражении из-за отклонения от целевого значения; y – измеренное значение характеристики продукции; m – целевое значение характеристики; $k=\frac{A_0}{\Delta^2}$ – экономическая константа, называемая коэффициент потерь качества; Δ – величина допуска; A_0 – стоимость замены или восстановления; $\bar{y}$ – среднее значение.

Здесь использован известный принцип, что при отклонении конкретной характеристики от установленной в спецификации цели потребитель несет потери, возрастающие квадратично (а не линейно) с увеличением этого отклонения. Эта концепция, предложенная Тагути, называемая функцией потерь качества (ФПК), подразумевает, что конструкторское намерение (установленная цель) достаточно хорошо согласуется с запросами потребителей. Такое мышление проектировщиков называют «Мышлением через ФПК».

Наложение распределений процессов на кривую ФПК показывает, что для минимизации потерь потребителя желательно настроить процесс (его центр) на требование потребителя (цель спецификации), а затем уменьшить изменчивость процесса около целевого значения непрерывно снижать.

Такой анализ называют настройкой «голоса потребителя». Он подтверждает, что при «менталитете ворот» 45 % полных потерь потребителя вызваны частями, находящимися вне поля допуска спецификации, что означает непонимание эффекта такого процесса для потребителей.

ФПК оказывается полезной на стадии определения допусков и количественной оценки продукции. А вот на стадии параметрического проектирования очень полезным является еще одна функция Тагути – отношение С/Ш. Это отношение выражается через основу ФПК – среднее квадратическое отклонение от цели. ФПК вместе с отношением С/Ш позволяет решить большинство задач РП.

Отношение С/Ш – идеальная метрика со следующими свойствами: оно отражает вариабельность в отклике системы, вызванной шумами, оно не зависит от регулировки среднего, оно измеряет относительное значение качества, что удобно для сравнения, оно не учитывает необязательные составляющие, таки например, как взаимодействие управляющих факторов.

Отношение С/Ш зависит от цели: цель номинальное значение (ЦНЗ), цель меньшее значение (ЦМЗ), цель большее значение (ЦБЗ), табл. 2.

Таблица 2. *Виды отношения сигнал/шум*

Для ЦНЗ	Для ЦМЗ	Для ЦБЗ
$С/Ш=10\log\frac{\bar{y}^2}{S^2}$	$С/Ш=10\log\frac{\sum_{i=1}^{n}y_i^2}{n}$	$С/Ш=-10\log\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}}{n}$

ЦНЗ предполагает двух шаговую оптимизацию:

- максимизацию С/Ш за счет минимизации чувствительности к ШФ;
- регулировку среднего значения к целевому номиналу.

Первостепенная задача РП – определится с управляющими факторами (УФ), ШФ, а затем определить параметры планирования эксперимента: объем проводимых опытов, количество уровней изменения факторов.

Выбор характеристик и факторов (табл. 3) – это важнейшая процедура, которая целиком и полностью зависит от компетентности команды проектировщиков.

Характеристика качества должна быть непрерывной, аддитивной, комплектной и фундаментальной величиной. Характеристик качества может быть несколько, тогда робастное проектирование проводится для каждой в отдельности.

Таблица 3. *Требования к факторам проектирования*

Факторы	*Условия и требования*
Характеристики качества (ХК) (отклик)	1. **ХК** должна быть непрерывна, легко измерима и количественно исчисленной. 2. **ХК** должна иметь абсолютный нуль (отсутствие отрицательных значений). 3. **ХК** должно быть аддитивной, в крайнем случае монотонной (независимость компонентов). 4. **Комплектность ХК** (обеспечение всей информации). 5. **Фундаментальность** (отсутствие *смещения* разных физических процессов и *реакции* на внешние возмущения после проведения оптимизации).
Шумовые факторы (ШФ) (шумовой эксперимент)	1. Ошибки эксперимента и наведенные шумы (измерения, деталировка уровня фактора, неучитываемые ШФ, взаимосвязи, ошибки оператора). Оцениваются дисперсией. 2. Внешние шумы, не зависящие от экспериментатора. 3. Внутренние шумы, зависящие от изменений образцов. 4. Объединенные шумовые факторы (ОШФ) по возрастанию и убыванию влияния на отклик.
Управляющие факторы	1. Технические параметры, обеспечивающие аддитивность и надежность системы. 2. Регулирующие факторы, позволяющие сместить систему к КЦФ (к целевому значению). 3. Группировать УФ, объединяющие вместе факторы, имеющие одинаковые влияние. 4. Факторы, не влияющие на уменьшение робастности.

Шумовые и управляющие факторы определяются путем лабораторных испытаний Из управляющих факторов выделяется регулирующие факторы, при этом используется отношение С/Ш. После выбора факторов приступают к основному эксперименту, который позволяет определить оптимальные уровни и предсказать оптимальные характеристики.

Оптимальное проектирование (оптимизация параметров) называют техникой качества проектировщиков [1], смысл которого состоит в максимизации прогнозируемого качества и минимизации непрогнозируемой части, рис. 2.

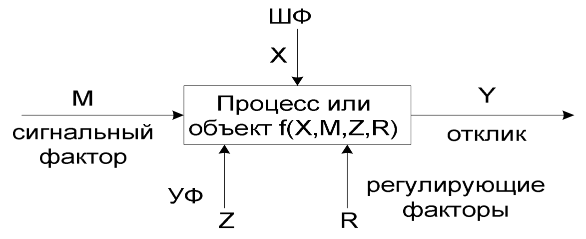


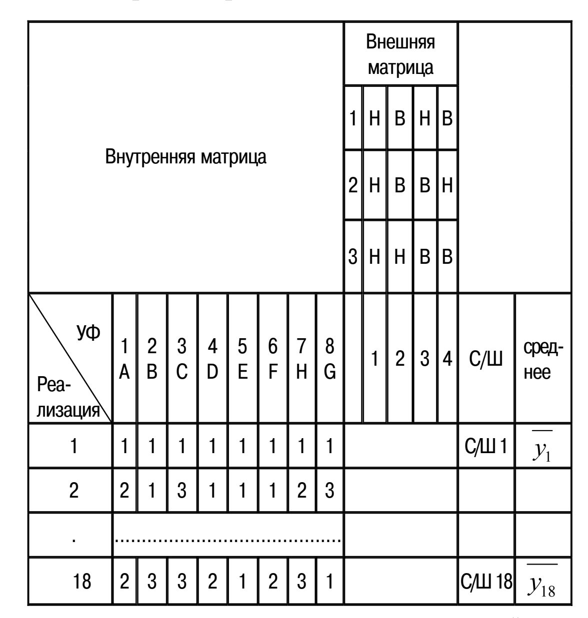
Рис. 2. *Оптимальное проектирование*

$$Y = f(x, M, Z, R) = g(M, Z, R) + e(x, M, Z, R),$$

где $g(M,Z,R)$ – прогнозируемое качество (max); $e(x,M,Z,R)$ – непрогнозируемая часть (min). Ортогональные матрицы в РП используют насыщенные планы со слабым взаимодействием. Пересечение внутренней (для УФ) и внешней (для ШФ) матриц (две или более комбинации шумов) позволяет:

- уточнить взаимозависимость между УФ и ШФ с целью определения влияния на отклик;
- управляемость ШФ и внешнее отношение системе позволяет точнее оценить возможность достижения робастности и возможности регулируемости УФ;
- определить влияния факторов на характеристика качества, оценить С/Ш, упростить анализ и представление данных, повышает эффективность проведения эксперимента всей командой.

Отношение С/Ш находится для каждой строки данных, оно позволяет проводить сравнение разных альтернатив, рис. 3.



Внутренняя матрица									Внешняя матрица					
									1	Н	В	Н	В	
									2	Н	В	В	Н	
									3	Н	Н	В	В	
УФ / Реализация	1 A	2 B	3 C	4 D	5 E	6 F	7 H	8 G		1	2	3	4	С/Ш	среднее
1	1	1	1	1	1	1	1	1						С/Ш 1	$\overline{y_1}$
2	2	1	3	1	1	1	2	3							
.															
18	2	3	3	2	1	2	3	1						С/Ш 18	$\overline{y_{18}}$

Рис. 3. *Пересечение матриц для параметрической оптимизации*

Пересечение внутренней и внешней матриц позволяет провести анализ и получить ответ на *три главных вопроса*:

1. Какой фактор и на каком уровне максимизирует отношение С/Ш?
2. Какие факторы оказывают малое влияние на отношение С/Ш?
3. Воздействует ли какой-то фактор на среднее значение?

Эти ответы представляются либо в виде таблицы или графика, что дает команде проектировщиков прекрасный ориентир для принятия решений.

После этого проводятся верификационные испытания с целью обоснованности нахождения оптимальной комбинации УФ, т. е. того, что оптимум предсказуем, повторяем и подтверждаем. Эти испытания позволяют сделать вывод, что правильно выбраны ШФ, ХК, УФ. При этом нельзя забывать, что *ни что не может заменить инженерный анализ.* Применение отношения С/Ш является идеальным инструментом инженерного качества и средством принятия правильных решений.

Проектирование допусков достигается путем оценки влияния величин факторов на изменение характеристик качества, интересующей исследователя. Если вариабельность факторов уменьшается (качество возрастает) за *реальную цену*, тогда и улучшение показателей качества позволяет понизить величину ФПК. Суммарное отклонение от номинала или целевого значения, можно представить в виде суммы отклонений всех исследуемых параметров или УФ, влияющих на изменение характеристик качества.

Отсутствие литературы по робастному проектированию привело кафедру к мысли разработать методическое пособие, в котором изложенные основы робастного проектирования в доступной форме помогут конструкторам или проектировщикам продукции и услуг понять его сущность и принять решение к его использованию в практической деятельности. Такой гигант как ОАО «АВТОВАЗ» заинтересовался робастным проектированием, проводя для высшего менеджера презентацию его методов. В результате этой презентации руководство приняло решение обучить методам робастного проектирования группу проектировщиков новых автомобилей ВАЗ. Первая группа была обучена на кафедре «Управление качеством, стандартизация и сертификация» в июне 2005 г. Обучались сотрудники НТЦ ВАЗа. Модульная программа в 120 ч содержала элементы математики, структурирования функции качества, планирования эксперимента и робастное проектирование и реализововалась по андрогагической модели обучения, т.е. обучающиеся выполняли выпускную работу, представляющую применение полученных знаний к проектированию узлов автомобиля. На ВАЗе уже создаются творческие группы применения полученных знаний в области РП. Это решение продиктовано высокими требованиями, предъявляемыми к качеству автомобилей, а также тем, что после вступления в ВТО внутренний рынок будет наполнен импортными автомобилями по цене, соизмеримой с вазовскими. Главным конструктором ОАО «АВТОВАЗ» В.И. Губа поддерживает идею РП, о чем свидетельствует его участие в разработке методического пособия [2].

В качестве примера рассмотрена выпускная работа слушателей Н.М. Митрофанова, М.Н. Гориной, Н.В. Гришиной, В.Ю. Фефёлкина на тему «Робастное проектирование сидения водителя», которые решали задачу проектирования качественного сидения водителя.

На первом этапе проведены исследования и построен «Домик качества». Следующий этап заключался в определении функции потерь качества по методу Тагути, для выбранных характеристик качества и определены финансовые потери потребителя. На последнем этапе проведено робастное проектирование одной характеристики качества, на примере которой показано влияние шумовых и управляющих факторов на качество одного параметра.

В результате опроса выявлены и систематизированы следующие пожелания: привлекательная обивка, не выцветающая ткань, плавные переходы геометрии сидения, плавная регулировка спинки сидения, возможность раскладки сидения горизонтально, плавная регулировка положения вперед назад, анатомическое облегание спины и возможность регулировки поджима поясничной части спины.

Дополнительное пожелание регулировка подголовника по высоте.

Полученные результаты рассмотрены командой. Проведен анализ, рассмотрены технические возможности реализации, изучен опыт фирм конкурентов и построен «домик качества».

Самый важный показатель для качественного сидения водителя это выбор наполнителя. Так же необходимо рассматривать качество ткани, раскрой и проектирование геометрических параметров сидения. Анализируя ранжирование требований потребителя и составив абсолютный вес каждого требования с помощью матрицы связи определены показатели матрицы цели. Из этой матрицы можно сделать вывод, что самым важным показателем ХК сидения водителя является жесткость наполнителя. Для полного анализа рассмотрены совместно матрицы корреляции, связи, цели и оценка конкурентов. Из этих матриц следует, что особое внимание следует уделить геометрии и жесткости наполнителя и обивке сидения.

Для определения ФПК рассмотрен показатель износостойкости ткани обивки сидения. Так как в этом случае цель наибольшее значение, т.е желательно больший срок службы обивочной ткани, расчет потерь потребителя произведем по формуле:

$$L = k\frac{1}{y^2},$$

где L – потери потребителя, k – финансовый коэффициент, а y – планируемый срок службы ткани. Для определения коэффициента k используется формула k=$A_0\Delta^2$, где Δ – допуск производителя.

Приняв срок службы выбранной ткани 10 лет, а A_0=3000 р. (стоимость замены обивки сидения) получаем Δ=8; k=3000*64=192000.

При установленном сроке службы автомобиля 8 лет (допуск производителя), ФПК для обивки сидения будет иметь вид:

$$L = \frac{192000}{y^2}.$$

В качестве характеристики качеств для робастного проектирования выбран параметр износостойкости ткани для обивки. Оценку характеристики качества ткани решением команды принято считать сопротивление разрыву образца шириной 5 см, а измерение производить усилием на разрыв, измеряемое в (кгс). Для определения (ХК) выбраны следующие шумовые факторы (ЩФ), это толщина нити в ткани – 1ШФ и плотность ткани – 2 ШФ.

В шумовом эксперименте приняты следующие значения: А – толщина нити: 0,1 мм – обозначим 1 В – Плотность ткани – 30 нитей /см"= Н 0,2 мм – обозначим 2 – 40 нитей /см"= П.

Провели шумовой эксперимент и составили табл. 4, 5. На рис. 4 показаны графики изменения средних значений в зависимости от уровней ШФ.

Таблица 4.

Реализация	Толщина нити	Плотность ткани	Результат 1 (кгс)	Результат 2 (кгс)	Среднее значение $\bar{y}$	Сумма квадратов отклонений
1	1	Н	563	559	561	8
2	1	П	658	642	650	128
3	2	П	753	755	754	2
4	2	Н	712	708	710	8
					668,75	36,5

Таблица 5. *Средние значения в шумовом эксперименте*

Фактор	Уровень	Усилие на разрыв
Толщина нити	1 2	605,5 732,0
Плотность ткани	Н П	635,5 702,0

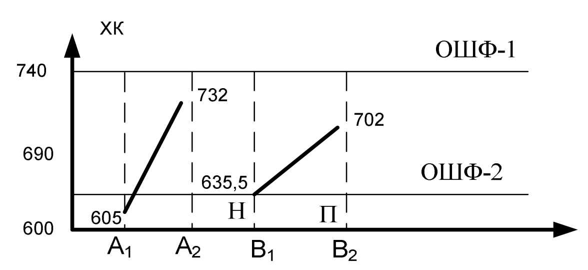


Рис. 4. *Объединенные ШФ на основе анализа средних значений*

Объединенные шумовые факторы ОШФ-1 состоят из факторов А и В на верхнем уровне, ОШФ-2 соответственно на нижнем. В табл. 6 приведен верификационный эксперимент, который подтверждает выбор ШФ.

Таблица 6. *Верификация шумового эксперимента*

ОШФ	Прогноз	Разрыв (факт)
ОШФ-1	765,35	770
ОШФ-2	579,85	569

В табл. 7, 8 представлен основной эксперимент, а на рис. 5 – управляющие факторы: материал – хлопок (Х) и синтетика (С); структура нити – гладкая (Г), крученая (К).

Таблица 7. *Основной эксперимент*

Реализация	Тип материала	Структура нити	Реплика 1	Реплика 2	Средняя	С/Ш
1	Х	Г	563	569	566	61,0
2	Х	К	638	642	640	62,1
3	С	Г	721	719	720	63,2
4	С	К	770	776	773	63,8
						62,53

Таблица 8. *Среднее значение основного эксперимента*

Фактор	Уровень	$\overline{С/Ш}$	$\overline{\Delta С/Ш}$	$\bar{y}$	$\Delta\bar{y}$
Материал	Х-A_1	61,55	1,95	603	144
	С-A_2	63,5		747,5	
Структура нити	Г-B_1	62,1	0,8	643	63,5
	К-B_2	62,9		706,5	

Исходя из анализа графиков изменения отношения сигнал/шум и измеряемых параметров можно сделать вывод, что определенная нами конфигурации управляющих факторов и выбранные характеристики качества были правильными. Поэтому можно принять выбранные управляющие факторы аддитивными и их оптимальное сочетание приведет к снижению стоимости и времени разработки проекта.

В заключении хотелось бы отметить, что слушатели (авторы этого учебного примера) с большой вероятностью предсказали качество обивки сидения водителя, что уже применяется на практике. Уже начал работать клуб любителей методов Тагути при кафедре «Управление качеством стандартизация и сертификация» Тольяттинского государственного университета, который видит свою миссию в распространении методов РП в широкую практику.

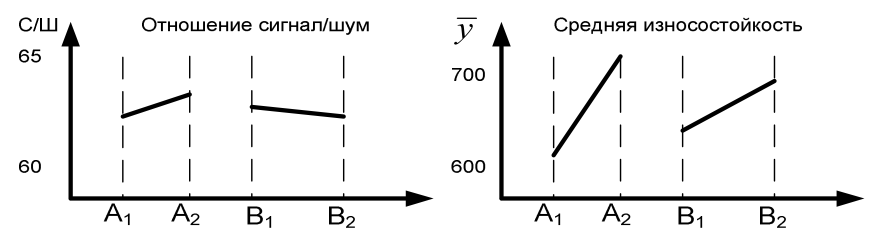


Рис. 5. *Воздействие факторов при параметрической оптимизации отношения С/Ш*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление качеством. Робастное проектирование. Методы Тагути. Пер. с англ. – М.: Сейфи, 2002. – 384 с.
2. Чернова Ю.К., Губа В.И. Инжиниринг качества. Методические указания к робастному проектированию по Генети Тагути. – Тольятти: ТГУ, ОАО «АВТОВАЗ», 2005. – 97 с.